

ZONIFICACIÓN DE PARTÍCULAS MENORES A 10 MICRAS (PM10) MEDIDAS DURANTE EL AÑO 2016 POR LA RED DISTRITAL DE CALIDAD DEL AIRE EN BOGOTÁ A TRAVÉS DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA



Autor:

Mario Leonardo Duque Rincón
Código: 3101369
Ingeniero Ambiental

Tutor:

Felipe Riaño Pérez
Ing. Civil, MSc. Educación

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCIÓN DE POSTGRADOS
ESPECIALIZACIÓN EN GEOMÁTICA
BOGOTÁ D. C 2017

ZONIFICACIÓN DE PARTÍCULAS MENORES A 10 MICRAS (PM10) MEDIDAS DURANTE EL AÑO 2016 POR LA RED DISTRITAL DE CALIDAD DEL AIRE EN BOGOTÁ A TRAVÉS DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

ZONIFICATION OF PARTICLES UNDER 10 MICRONS (PM10) MEASURES DURING THE YEAR 2016 BY THE DISTRICT AIR QUALITY NETWORK IN BOGOTÁ THROUGH GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS

Mario Leonardo Duque Rincón
Especialización en Geomática,
Universidad Militar Nueva Granada
Bogotá D.C., Colombia,
leoduquerincon@gmail.com

ABSTRACT

The PM10 pollutant behavior measured during the year 2016 in the Air Quality Monitoring Network of Bogota was done using both the open data available on the platforms of the District's Environmental Department of the city, geographic data Of the city of Bogotá and the location of the stations that compose the network to create a geographical context, and finally tools of space analysis present in ArcGIS; The project was carried out in order to determine the representativeness of the data when evaluating the state of air quality throughout the jurisdiction of Bogotá and the accuracy of the interpolation proposed.

The results showed acceptable behavior of the contaminant within the metropolitan area of the city, with peaks in the localities of Puente Aranda, Kennedy, Tunjuelito y Fontibón where its concentration is above the annual normative minimum established in resolution 610 of 2010 of the then Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Housing and Sustainable Development; On the other hand, in the space environment, the need to increase the distribution of indicative stations (mainly for PM10 measurement) was determined, both within the urban

sector of the city and the rural area within its jurisdiction, to obtain more High importance that help to improve the result of the interpolation carried out by the geographic information system.

Keywords: Bogota Air Quality Monitoring Network (RMCAB), Particles smaller than ten microns (PM10), Geographic Information System (GIS), spatial analysis, average, interpolation.

RESUMEN

Se realizó la zonificación del comportamiento del contaminante PM10 medido durante el año 2016 en la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, para ello se utilizó tanto los datos abiertos disponibles en las plataformas de la Secretaría Distrital de Ambiente de la ciudad, datos geográficos de la ciudad de Bogotá y de la ubicación de las estaciones que componen la red para crear un contexto geográfico, y finalmente herramientas de análisis espacial presentes en la herramienta ArcGIS; el proyecto se realizó con el fin de determinar la representatividad de los datos a la hora de evaluar el estado de la calidad del aire en toda la jurisdicción de Bogotá y la asertividad de la interpolación planteada.

El trabajo arrojó como resultados un comportamiento aceptable del contaminante dentro del área metropolitana de la ciudad, con picos en las localidades de Puente Aranda, Kennedy, Tunjuelito y Fontibón, donde su concentración está por encima del mínimo normativo anual establecido en la resolución 610 de 2010 del entonces Ministerio de ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible; por otro lado, en el entorno espacial se determinó la necesidad de aumentar la distribución de estaciones indicativas (principalmente para la medición de PM10), tanto dentro del sector urbano de la ciudad, como del área rural que pertenece a su jurisdicción, para obtener más altos que ayuden a mejorar el resultado arrojado por la interpolación realizada por el sistema de información geográfica.

Palabras clave: Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), Partículas menores a diez micras (PM10), Sistema de Información Geográfica (SIG), análisis espacial, promedio, interpolación.

INTRODUCCIÓN

Debido a diferentes aspectos relacionados con el crecimiento poblacional, el aumento y mecanización de las actividades laborales y su bajo compromiso con los posibles impactos que generan, el medio ambiente y los ecosistemas han sufrido bastantes alteraciones a nivel local y regional; entre los aspectos ambientales involucrados se encuentran las emisiones atmosféricas producidas por fuentes tanto móviles (vehículos) como fijas (chimeneas), estas emisiones arrojan a la atmósfera diferentes tipos de compuestos entre los que se encuentran las partículas menores a 10 micras (PM10), las cuales, debido a su diminuto

tamaño, permanecen suspendidas en el aire siendo transportadas por fenómenos climatológicos y también son respirables por los humanos afectando su salud.

En la ciudad de Bogotá existe una red de monitoreo de calidad del aire, la cual se encarga de vigilar el comportamiento de los contaminantes que se pueden presentar en la matriz aire, dichas estaciones se encuentran ubicadas dentro de la ciudad; dentro de sus actividades se encuentra generar reportes horarios de las concentraciones medidas por los sensores, los cuales se encuentran como datos abiertos en la página web de la Secretaría Distrital de Ambiente.

Ya que las estaciones cubren un área determinada en la ciudad, se planteó la generación de una zonificación del comportamiento del PM10 en el año 2016 a través de análisis espacial en el área que corresponde a la jurisdicción de Bogotá, utilizando para ello herramientas SIG disponibles en el software ArcGIS, esto con el fin de determinar la representatividad de los datos tomados por las estaciones de la RMCAB entorno tanto al cumplimiento ambiental, como a la veracidad de la distribución espacial que el contaminante tiene en la ciudad.

1. JUSTIFICACIÓN

Los sistemas de información geográfica son una serie de entornos integrados (Software, personal especializado, Hardware, datos y metodología - Longley, Goodchild, Maguire y Rhindd, 2005) que ayudan a la planificación, evaluación, y la toma de decisiones entorno a un área determinada, para ello se pueden realizar representaciones del territorio y sus diferentes características, ya sean estas de carácter evidente o abstracto; generando evidencias del comportamiento del territorio o la influencia de un agente externo en él. Una de las mayores ventajas de los SIG es su aplicación en las distintas áreas del conocimiento, por ejemplo de origen social y/o científico, esto debido a la facilidad en la presentación de los resultados de diferentes tipos de hipótesis planteadas.

En la gestión ambiental de cualquier territorio es necesario el monitoreo del estado de los componentes del entorno, entre ellos se encuentra la matriz aire, donde es de vital importancia la medición de los posibles efectos e impactos que una determinada actividad puede causar; este tipo de controles van de la mano entre los entes gubernamentales y los actores responsables del progreso económico de una comunidad para así poder generar políticas que prevean, corrijan y mejoren las actividades asociadas a la contaminación del medio ambiente.

En la ciudad de Bogotá actualmente existe la Red de Monitoreo de Calidad del Aire, la cual se encarga del muestreo y análisis de la concentración de contaminantes y recopilación y distribución de la información obtenida para el conocimiento, elaboración de políticas y toma de decisiones; sin embargo, esta

herramienta no muestra la distribución y la interacción que tengan los contaminantes en zonas fuera del área de influencia de las estaciones de monitoreo, creando una incógnita en el comportamiento de la calidad del aire en varios sectores de la ciudad.

Utilizando herramientas de interpolación construidas para ser aplicadas en un territorio (2 dimensiones) aplicadas a una variable independiente se puede obtener una simulación del posible comportamiento de esta variable en zonas donde no existe información del mismo, este tipo de interpolaciones son una herramienta disponible dentro de los sistemas de información geográfica y específicamente en ArcGIS, lo que ayuda a determinar, dependiendo de la calidad y distribución de los datos, el comportamiento de una variable que en este caso podría ser algún contaminante medido en la RMCAB. Para comprobar la conveniencia en la utilización de herramientas SIG en el comportamiento de la calidad del aire de Bogotá, se utilizó el parámetro PM10 (debido a su importancia en el impacto en la salud de los seres vivos y en el medio ambiente).

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Bogotá se encuentra ubicada en la zona central del país, dentro de la cordillera occidental, abarcando *“una extensión aproximada de 33 kilómetros de sur a norte y 16 kilómetros de oriente a occidente”* (Alcaldía de Bogotá, 2017) siendo así la ciudad más importante a nivel administrativo y gubernamental del país.

Dentro de su área urbana, la ciudad alberga una gran variedad en cuanto a la distribución de las diferentes actividades económicas de tipo industrial así como una densidad poblacional de tipo residencial según el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU, 2017) de 972 habitantes / hectárea y una densidad total de 42 habitantes / hectárea; lo que indica que es una ciudad que concentra una cantidad de gente en áreas insuficientes en muchos casos pero que hay extensiones de terreno que son utilizadas con fines recreativos, comerciales e industriales; por otro lado, en la dinámica de ciudad, los habitantes de la ciudad utilizan diferentes medios de transporte para poder desplazarse a realizar las diferentes actividades del día a día, haciendo que exista la necesidad del uso de vehículos a lo largo del día en todo el casco urbano.

2.1 Análisis de la problemática ambiental

Todas las actividades que realiza el hombre en su cotidianidad generan algún tipo de impacto ambiental que puede alterar de manera negativa la salud de las especies así como deteriorar de manera significativa el entorno que se rodea; entre los compuestos contaminantes más comunes se encuentra el PM10. Estas

partículas se pueden generar de diferentes formas, ya sea por la transformación de materias primas tales como maderas, material de construcción, minería entre otras; o bien sea por el uso de combustibles como gasolina, carbón, ACPM y otros.

Según Rojas (2010), en Bogotá el 60 % de la cantidad de PM10 presente es generado a partir de procesos industriales mientras que el 40 % restante corresponde a la emisión de gases de fuentes móviles, donde de este porcentaje, el 90% se presenta en los vehículos de tipo Diésel (como camiones, camionetas entre otros) los cuales en muchas ocasiones realizan recorridos muy largos y durante un horario extenso en la ciudad.

la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) por medio de la resolución 6982 de 2011, que determina los límites máximos permisibles de emisión de fuentes fijas (chimeneas) estipula que para fuentes antiguas (presentes antes de la emisión de la norma) el valor máximo de emisión permitido es de 75 mg/m^3 y una concentración de 50 mg/m^3 para fuentes nuevas de material particulado (no especifica tamaño de las partículas); por otro lado, los valores mínimos de aceptación de emisión para fuentes móviles, dados en la resolución 1111 de 2013 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) son dados dependiendo del tipo de vehículo, donde las concentraciones varían entre 0,025 y 0,06 g/km (gramo de CO2 por kilómetro). Los valores normativos pueden llegar a ser muy laxos debido al crecimiento de la ciudad y por lo tanto de la industria, la existencia de vehículos de modelos antiguos, al aumento de la compra y uso de los mismos.

Aunque la perspectiva del comportamiento del contaminante en la ciudad no muestra cambio favorable o desfavorable en la calidad del aire de desde la creación de la red de monitoreo de calidad del aire (Rojas, 2010), si se evidencia a nivel subjetivo alteraciones en la salud de los ciudadanos que pueden estar asociadas de manera indirecta a la inhalación del compuesto evaluado desmejorando así la calidad de vida de los mismos.

3.1 OBJETIVOS

3.1 General

Realizar la delimitación y zonificación del comportamiento de las partículas menores a 10 micras (PM10) medidas por la red de monitoreo de calidad del aire de la Secretaría Distrital de Ambiente en Bogotá D.C. por medio de interpolaciones aplicadas con herramientas del software ArcGIS.

3.2 Específicos

- Determinar los valores promedio del año 2016 de la concentración del parámetro PM10 en cada una de las estaciones que componen la red de calidad del aire de Bogotá.
- Generar una salida gráfica de la interpolación del promedio de la concentración del contaminante PM10 utilizando el software ArcGIS, siguiendo los lineamientos estipulados en cuanto a igualdad de formato de las capas utilizadas.
- Determinar el comportamiento del parámetro PM10 durante el año 2016 en la ciudad de Bogotá y la suficiencia de datos de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire en la zona urbana de la ciudad.

4.1 MARCO TEÓRICO

4.1 Partículas menores a 10 micras (PM10)

El material particulado se conoce como partículas (sólidos y algunos líquidos) de pequeño tamaño que permanecen suspendidos en el aire por cierta cantidad de tiempo, algunas de estas partículas pueden ser determinadas a simple vista debido a sus características de color o tamaño, pero algunas solo pueden ser determinadas a través de su recolección utilizando instrumentos de muestreo (EPA, 2017).

Existen diferentes tamaños de partículas en la atmósfera, pero únicamente las partículas con un grosor menor a 10 micras (conocidas como PM10) son respirables por los humanos (EPA, 2017) ; estas partículas pueden pasar a través de los pulmones y posiblemente llegar al torrente sanguíneo, también se encuentran directamente involucradas en enfermedades de tipo respiratorias como dificultad de respiración, sensibilidad pulmonar y en algunos casos hasta paros cardíacos y muertes por enfermedades degenerativas como el cáncer de pulmón (EPA, 2017).

Por otro lado, el PM10 contribuye al decaimiento del medio ambiente, ya que el material particulado deteriora la visibilidad del paisaje, se deposita en la flora de la región afectando su color y sensibilidad, influyen la alteración de los regímenes de nutrientes del recurso hídrico y contribuye a convertir los espacios en ambientes más ácidos (EPA, 2017).

La generación de estas partículas y su presencia en el aire que respiramos se puede dar de manera natural por los regímenes de vientos que hacen parte de los ciclos de erosión de suelos, y principalmente al origen antrópico, ya sea por actividades mineras o el uso de combustibles fósiles o minerales (carbón) además de malos procesos de combustión.

4.2 Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) y Obtención de datos.

Debido a las necesidades de conocer el estado de la calidad del aire de Bogotá, el distrito ha gestionado la creación de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire, la cual cuenta con una serie de instrumentos automáticos o semiautomáticos que miden los diferentes parámetros que determinan el estado de la contaminación del aire en un área específica. Tal y como especifica la SDA (2017) en su página web, los métodos de monitoreo de estos contaminantes (entre los que se incluye el PM10) se encuentran descritos en las especificaciones del código federal de regulación - título 40 - de la EPA, asegurando la representatividad de las concentraciones medidas.

La RMCAB cuenta con un total de 13 estaciones fijas distribuidas a lo largo del casco urbano de la ciudad y una estación móvil, la cual es utilizada para medir lugares específicos durante un periodo específico de tiempo. Las concentraciones, generalmente se calculan con frecuencia horaria y los resultados obtenidos por los sensores y analizadores, pasan a través de servidores donde son enviados a las sedes de la SDA en *una estación central, donde son analizados, validados y procesados* (SDA, 2017) para establecer políticas entorno a las condiciones ambientales del territorio.

Dentro de los aplicativos con los que cuenta la RMCAB se encuentra la visualización y consulta de los resultados históricos medidos y datos abiertos disponibles al público en general, es de ahí donde se obtuvieron los datos de las mediciones de PM10 realizadas durante el año 2016 en la RMCAB. En la imagen 1 se puede observar la interfaz gráfica del portal de datos abiertos de la RMCAB.



Imagen 1. Visor de consulta de datos abiertos de mediciones ambientales de la RMCAB

Fuente: RMCAB de la SDA, Página web consultada el 08-06-2017

4.3 Sistemas de Información Geográfica SIG

En el entorno de la tierra, cualquier evento que tenga una influencia determinada tiene que ocurrir en algún lado, ya sea esto sobre la superficie o al interior de la tierra, y cualquier decisión tomada por el ser humano, generalmente tiene una repercusión que puede llegar a ser ubicada (Longley, Goodchild, Maguire y Rhindd, 2005); los posibles problemas presentes dentro de la gestión geográfica deben ser clasificados según su locación, utilizando herramientas de escala, clasificación entre otros, lo que al fin de cuentas nos ayuda a entender el comportamiento de la tierra.

Los sistemas de información son utilizados para poder entender y manipular la información que ya se conoce, y generar a través de ello nueva información, en este contexto, la información geográfica cuenta con múltiples ventajas para su utilización, ya que puede explicar información en múltiples dimensiones, cuenta con un rango amplio de resolución, se puede alimentar fácilmente de varias área de conocimiento, su entendimiento puede ser graficado para un mejor entendimiento, entre otras(Longley, Goodchild, Maguire y Rhindd, 2005).

Con el desarrollo tecnológico de los últimos años, se han generado diferentes herramientas que han ayudado a modernizar el uso de la información geográfica, generando así el concepto de Sistema de Información Geográfica (SIG) , el cual se dio por primera vez en Canadá alrededor de la década de los 60, donde se obtuvo como principal resultado el inventario de áreas que no habían podido ser medidas por su difícil acceso (Longley, Goodchild, Maguire y Rhindd, 2005), este evento dio inicio a la digitalización de los mapas por parte de diferentes entes públicos de los países desarrollados motivados inicialmente por intenciones militares; fue hasta la década de los 80's donde se empezó a ver a los sistemas de información geográfica como una ayuda para la toma de decisiones en otros campos, lo que fue influenciado por la creciente facilidad de acceso a los computadores y bases de datos previamente clasificadas.

Actualmente se considera a los SIG como un conjunto de componentes donde se desglosan las herramientas tecnológicas (software y hardware), profesionales capacitados, bases de datos e información y procesamiento de los mismos, y actualmente el considerado más importante, la distribución por redes virtuales, que permiten la interconectividad entre usuarios (Longley, Goodchild, Maguire y Rhindd, 2005). En la imagen 2 se puede ver la interacción de todas las partes integrantes de los SIG.

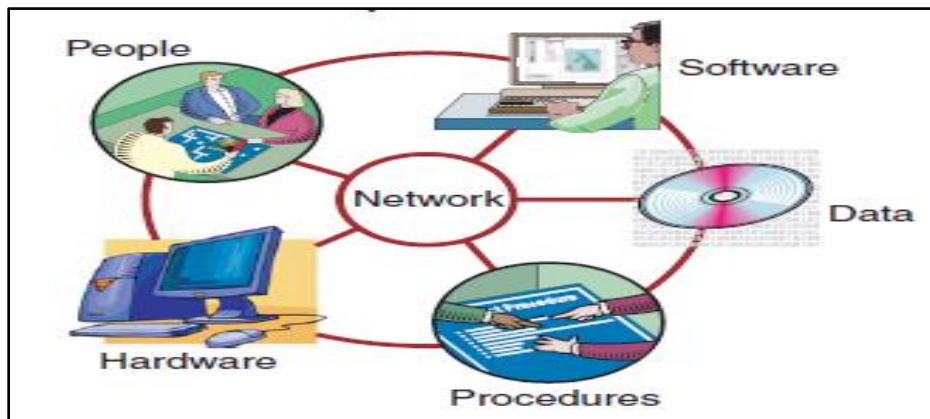


Imagen 2. Componentes actuales de los SIG
Fuente: Longley, Goodchild, Maguire y Rhindd, 2005

4.4 Análisis espacial de datos

La herramienta más significativa del uso de los SIG es la capacidad de realizar análisis espacial y modelamiento de una característica del territorio, donde se combina el uso de variables independientes con diferente tipo de operadores espaciales, determinando entre varias cosas, si los datos iniciales son válidos para simular su comportamiento en un territorio determinado (ESRI, 2015).

Para poder generar cualquier tipo de análisis espacial, ESRI (2015) plantea una metodología ordenada para generar los mejores resultados , estos pasos son:

- Generar una pregunta: Esto para la solución de un problema o una necesidad utilizando análisis espacial, es decir, el planteamiento de un escenario donde se pueda utilizar las herramientas SIG.
- Calcular: Los SIG cuentan con diferentes tipos de herramientas que permiten generar interpretaciones de tipo espacial, explorando diferentes características ya sean estas topológicas (relación espacial con el territorio) o de variables abstractas que pertenecen al área temática de la cartografía.
- Interpretación: El software como tal, genera una serie de resultados que, dependiendo el profesional, sirven para clasificar las diferentes circunstancias encontradas en los resultados arrojados por la herramienta SIG.
- Decisión y comunicación: Las conclusiones que genera el análisis espacial de un determinado proyecto, lo que va a ayudar al desarrollo de las actividades o a la gestión del territorio; y es el punto más importante del análisis espacial; brindándonos así un soporte para la toma de decisiones.

Los SIG manejan principalmente 2 tipos de representaciones, los datos de tipo Raster, que son extensiones de territorio divididas a través de filas y columnas que generan celdas a las cuales se les asigna un determinado valor y son generalmente capturadas a través de sensoramiento remoto o generadas por las herramientas SIG (Longley, Goodchild, Maguire y Rhindd, 2005), por otro lado existe el formato Vector, el cual se trata de una serie de puntos, líneas unidas por vértices o figuras geométricas que simulan una característica del territorio o pueden asociarse a valores abstractos del mismo (Longley, Goodchild, Maguire y Rhindd, 2005).

El uso de los formatos de representación para la generación de análisis espacial, permite, utilizando diferentes tecnologías, una mejor explicación del mundo real, dependiendo de la característica que se quiera observar formatos Raster o Vector, atando esta información a una ubicación determinada; lo que se conoce como el manejo de los atributos de una región (ESRI, 2015).

5.1 MARCO METODOLÓGICO

Para la realización de la zonificación de la concentración anual de PM₁₀ en medida en la RMCAB de Bogotá en el año 2016 se establecieron las fases desglosadas en diagrama 1:

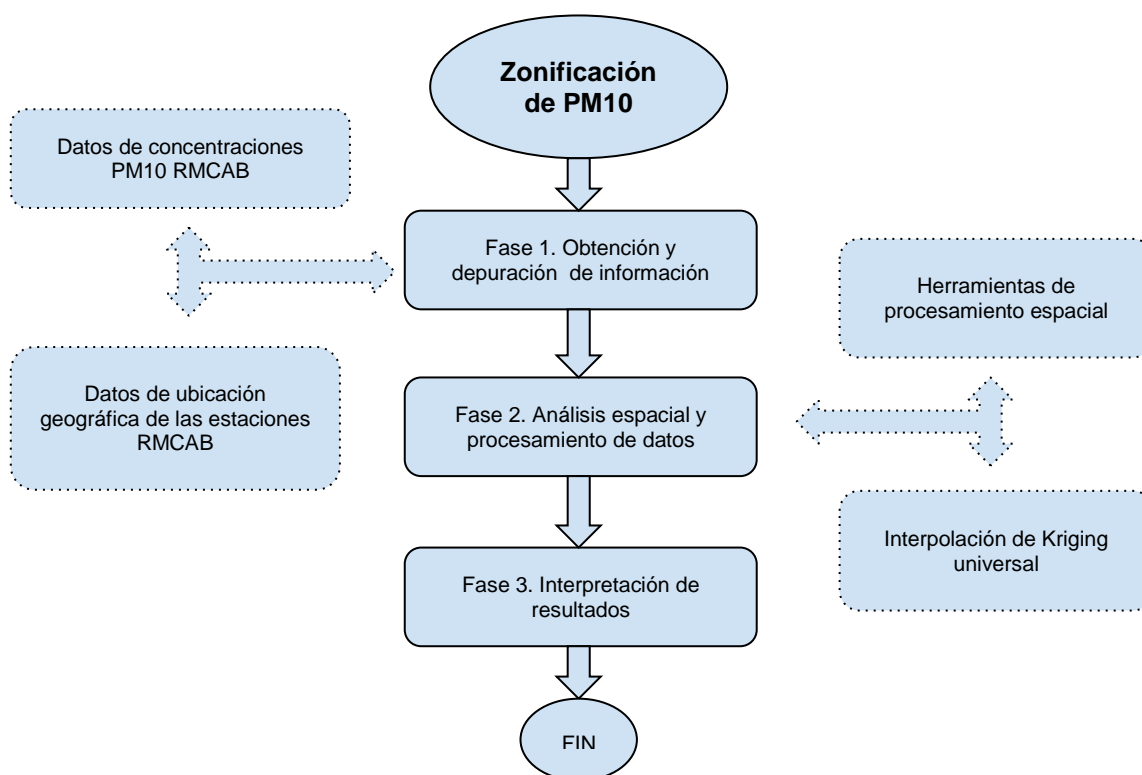


Diagrama 1: Descripción metodológica de zonificación de PM₁₀
Fuente: Elaboración propia

5.1 Obtención y depuración de información.

Para la obtención de los datos abiertos a través del servidor de la RMCAB se tuvieron en cuenta las siguientes premisas:

- Debido al tiempo delimitado para la realización de la zonificación, únicamente se consultó y utilizó la información proveniente de las estaciones fijas de la red.
- Se realizó la descarga de promedios diarios del contaminante en cada una de las estaciones fijas con el fin de determinar posibles periodos de no funcionamiento de la red o alguna de sus estaciones por motivos de mantenimiento u otros.
- Se analizó de manera general (mes a mes) la cantidad y calidad de los datos de cada estación de la RMCAB con el fin de determinar su viabilidad en la zonificación del contaminante en la ciudad.

5.2 Análisis espacial y procesamiento de datos.

El análisis espacial de los datos consistió en relacionar la ubicación geográfica de las estaciones de la RMCAB con los promedios mensuales y el promedio anual por cada estación del a concentración de PM10.

La obtención de las coordenadas de las estaciones se realizó a partir de información libre de disponible en la página de la SDA, por otro lado, para entregar un marco geográfico de referencia, se utilizó información libre de la ciudad de Bogotá presente en los datos libres de Oracle.

Toda la información de origen geográfico fue tratada a través de funciones del software ArcGIS para ser proyectados en un sistema de referencia local, esto con fines de entendimiento de la distribución regional de las estaciones. Una vez ubicadas las estaciones en un entorno geográfico, se ha relacionado cada una de ellas como atributo una tabla con los datos de las concentraciones disponibles de las estaciones.

Con la creación de la relación entre la ubicación de las estaciones el atributo que asigna la concentración anual a cada una de ellas, se utilizó la herramienta de interpolación de kriging presente en el software ArcGIS, que consiste en la interpolación de datos distribuidos en el espacio, estableciendo relaciones

estadísticas entre sus distancias y suavizando los resultados (ESRI, 2017) y así determinar el comportamiento del parámetro en el área de influencia de las estaciones de la RMCAB; el resultado final obtenido se representó a través de un mapa de la zona de influencia, el cual se creó utilizando herramientas de geoprocetamiento y edición en el software SIG.

5.3 Interpretación de resultados.

Una vez generada la salida gráfica de los resultados obtenidos, es necesario determinar la influencia del proyecto realizado y su importancia en la determinación del estado de la calidad del aire en la ciudad, para ello se planteó un análisis de la representatividad de los datos y de su tratamiento, así como las posibles aplicaciones que puede tener este sistema de información creado. Por otro lado, se determinó el tipo de relación que tiene el cambio de las concentraciones con la ubicación de las estaciones de la RMCAB y el entorno que la rodea a cada una; finalmente se mencionaron conclusiones y recomendaciones para actividades futuras en torno al estudio de la calidad del aire a través de análisis espacial.

6.1 RESULTADOS

6.1 RMCAB y datos de concentraciones de PM10 en 2016.

La RMCAB se ha distribuido por localidades, para así poder contar con información del estado de la calidad del aire al menos de una estación por sector, sin embargo, según se observa en las imágenes 3 y 4, al día de hoy no se cuenta con total cubrimiento de toda el área de influencia de la ciudad, ya que las estaciones se encuentran centralizadas hacia la zona urbana de la ciudad, dejando por fuera sectores de uso mixto o rural tales como las localidades de Usme, Ciudad Bolívar o Sumapaz, donde en principio, debido a la poca densidad poblacional e industrial de la región, se piensa que cuentan con una calidad del aire en buenas condiciones.

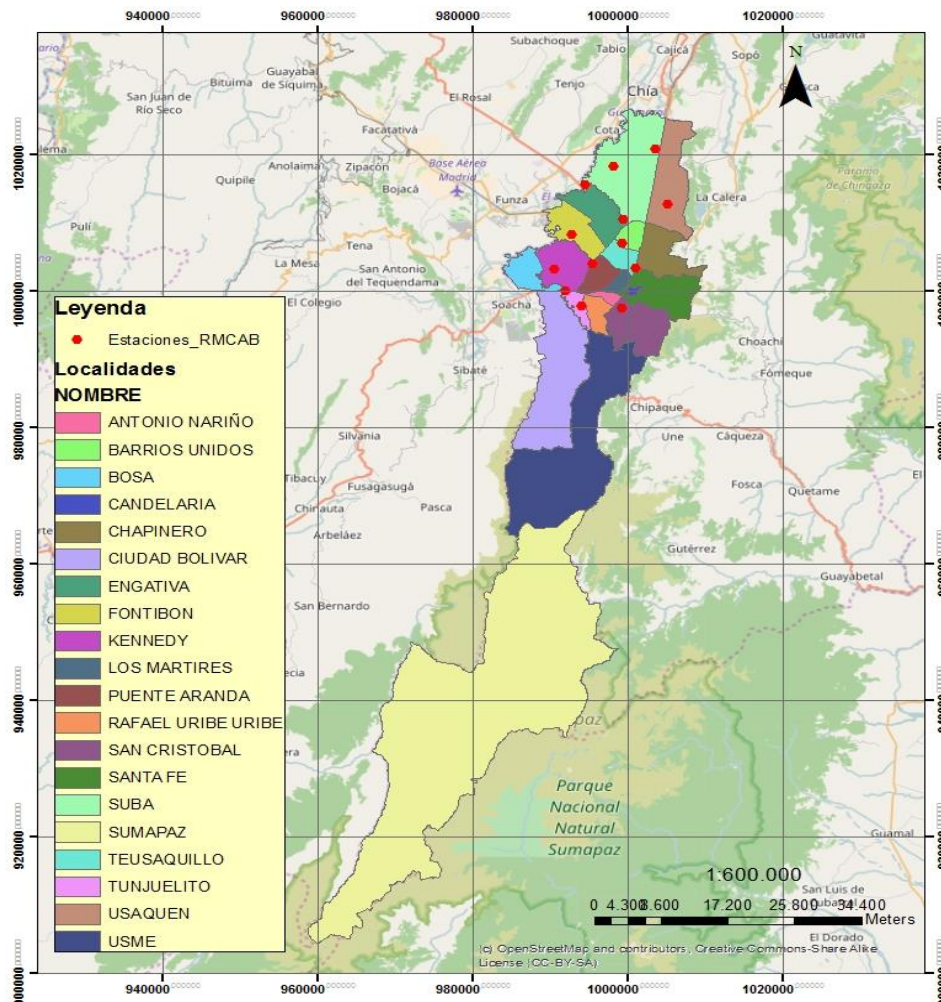


Imagen 3: Ubicación de las estaciones de la RMCAB
Fuente: Elaboración propia

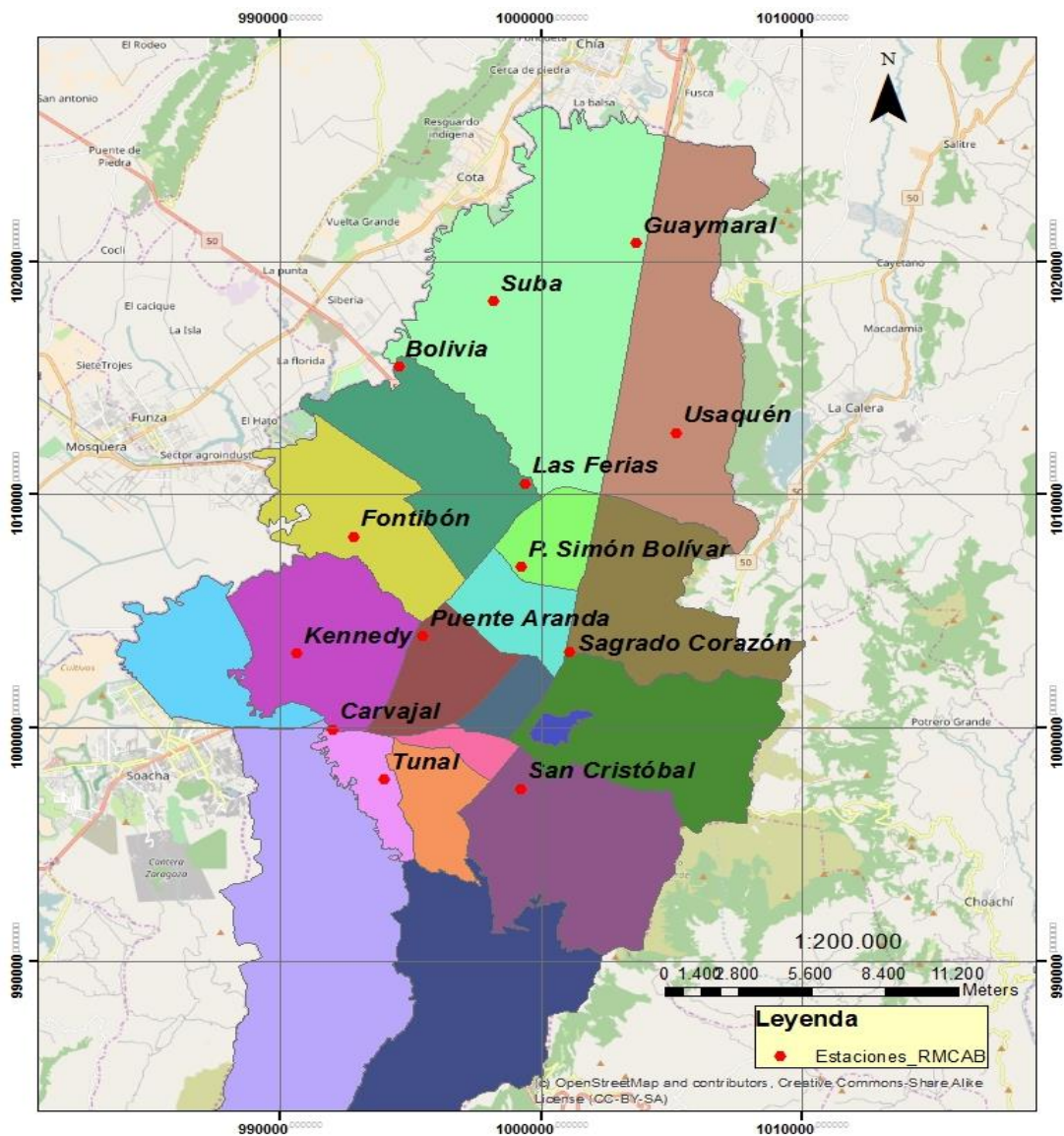


Imagen 4: Ubicación detallada de las estaciones de la RMCAB
Fuente: Elaboración propia

El objetivo principal de esta distribución es cubrir las zonas donde las actividades industriales y el uso de vehículos, así como los posibles obstáculos y barreras antrópicas no permiten la dispersión de los contaminantes alterando así la calidad del aire del sector.

A través de la plataforma de datos abiertos de la RMCAB se obtuvieron los promedios diarios de la concentración de PM₁₀ (µg/m³) de las estaciones disponibles de la red, estos datos fueron promediados mensualmente y contados para obtener un porcentaje de uso de los mismos, a continuación se muestran las estaciones disponibles y sus concentraciones promedio mensuales, así como su promedio anual:

Tabla 1: Concentraciones promedio mensuales y anual de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) medidos en la RMCAB en el año 2016

Estacion Mes	Guaymaral	Usaquén	Suba	Las Ferias	P. Simón Bolívar	Sagrado Corazón	Puente Aranda	Kennedy	Carvajal	San Cristóbal
Enero	47,3	64,2	69,1	62,2	55,2	54,5	73,1	83,5	93,4	52
Febrero	37,7	51,2	67	48,2	41,5	40,8	61,6	74,7	91,3	33,5
Marzo	48	58,9	67,4	54	50,6	48,7	69,2	63,7	104,6	41,2
Abril	30,1	42,9	45,7	42,2	30,4	42	54,2	65,5	Sin Funcionamiento	28,2
Mayo	22,3	29,8	35,2	29,4	21,9	28,9	45,4	54,1	70,4	16,7
Junio	21	27,5	43,5	23,9	17,4	22,9	37,8	46,1	64,5	12,4
Julio	21,5	27,3	45,2	22,9	16,1	21,2	33,5	45,2	58,6	15,5
Agosto	25,7	32,4	50,8	28,2	19,7	22,3	39,4	53,3	67,1	17,1
Septiembre	29	38,1	62,5	35,2	28,6	25,5	41,7	53	67,3	19,9
Octubre	34,3	50,1	42,7	41,3	38	34,7	50,1	52,2	70,9	22
Noviembre	28,7	46,2	40,8	44,2	41,7	35,1	55,4	50,4	78,6	25
Diciembre	32,3	40,3	51,3	43,3	42	37,1	62,6	61	85,4	28,5
Días de funcionamiento anual	318	338	288	345	335	352	351	314	304	315
Porcentaje anual de datos válidos (%)	88,3	93,9	80,0	96,8	93,1	97,8	97,5	87,2	84,4	87,5
Promedio Anual	32,3	43,5	53,3	40,5	34,7	35	52,6	59	78,2	26,8

Fuente: SDA -RMCAB

La primera observación de los datos obtenidos es que de las estaciones Tunal, Bolivia, y Fontibón, así como de la estación móvil no se pudo descargar información, lo que puede deberse a que se encontraron en mantenimiento y/o arreglo durante el año 2016 o que la plataforma no se encuentra adaptada para ellas; esto significa que la zonificación se no va a generar datos con respecto a las mediciones de estas 3 zonas, pero se puede llegar a intuir su comportamiento durante el año de mediciones.

Por otro lado, la información de las estaciones disponibles cuenta con un total de mediciones diarias válidas en el 2016 mayor al 80%, lo que nos da un grado de representatividad de los datos alto; ya en la revisión mes a mes se pudo observar que la estación Carvajal no registró datos durante el mes de abril, razón por la cual el producto final de que genera el análisis espacial puede verse algo sesgado, sin embargo, para generar el promedio anual de esta estación no se tuvo en cuenta con tal de obtener un valor indicativo de la zona con los datos de los otros meses.

6.2 Distribución de la concentración de PM10.

Para la generación de la distribución de las concentraciones de PM10 en el área urbana de Bogotá, se realizó la asignación de los valores inherentes a cada estación, y por medio de la herramienta ArcGIS se determinó el área de influencia de la zonificación junto con su comportamiento anual.

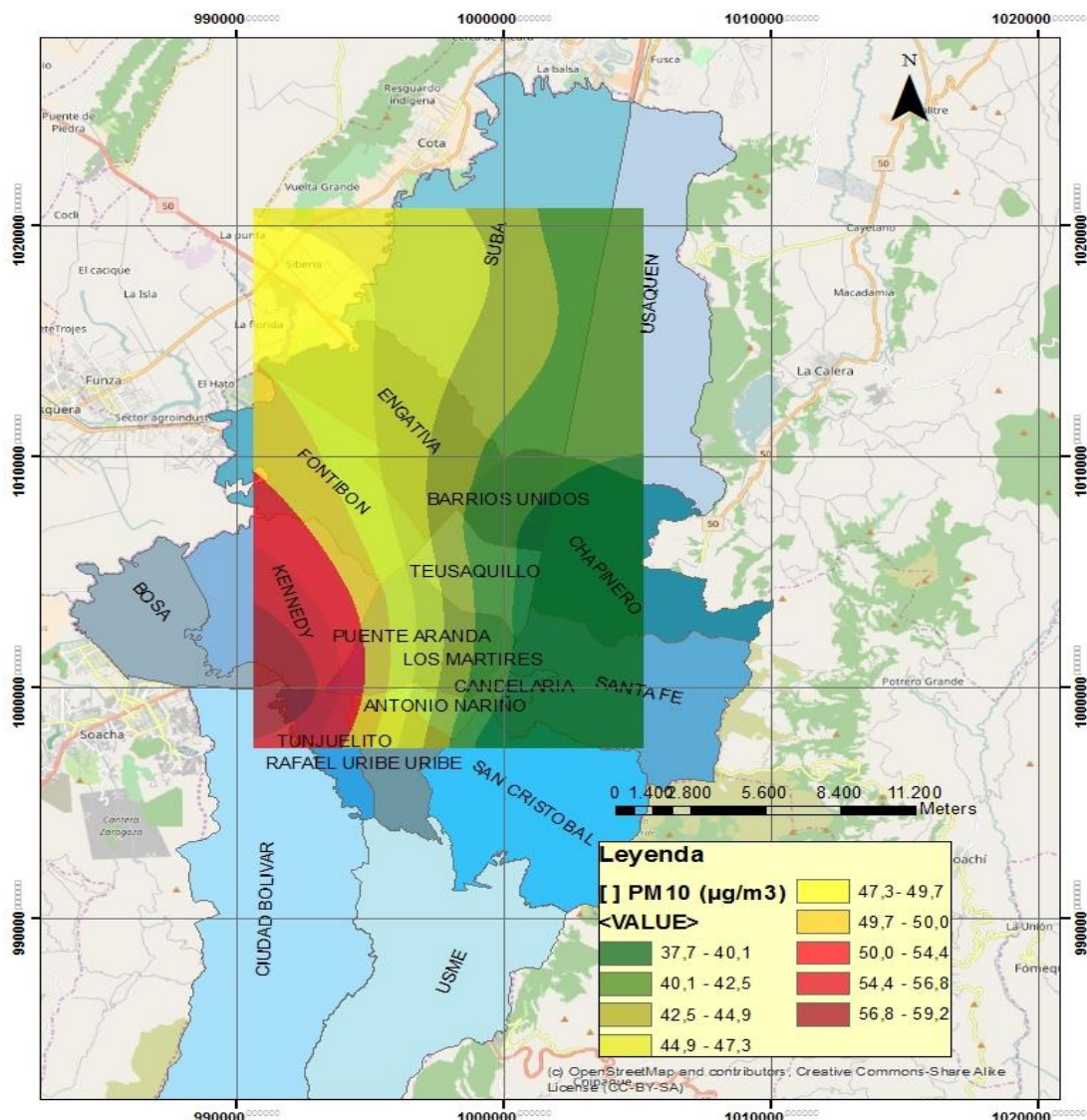


Imagen 5: Zonificación de la concentración de PM10 en el año 2016 en el área de influencia de la RMCAB

Fuente: Elaboración propia

La salida grafica (imagen 5) muestra un rango de colores que representan el comportamiento del contaminante analizado en la zona de influencia de las estaciones de la RMCAB, donde los valores verdes (37,7 – 44,9 µg/m³) son rangos con un comportamiento aceptable de la concentración de PM10, los valores amarillos (44,9 – 50, 0 µg/m³) son zonas que, aunque estan dentro del mínimo normativo aplicable, se encuentran en riesgo de aumentar la presencia de PM10 y por lo tanto disminuir la calidad del aire del sector, finalmente las zonas denotadas con valores rojos (50,0 – 59,2 µg/m³) son consideradas como lugares con deficiente calidad del aire debido a que cuentan con concentraciones que afectan de manera significativa tanto la salud como el medio ambiente.

De acuerdo a los resultados obtenidos de la interpolación de las concentraciones

para la zonificación del contaminante encontramos que las localidades de Puente Aranda, Kennedy, Tunjuelito y Fontibón, la concentración de este contaminante está en niveles superiores al grado de aceptabilidad establecido por la autoridad ambiental ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de promedio anual para PM10 según la resolución 610 de 2010 del entonces Ministerio de ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial); este resultado puede deberse a que en estas localidades se ubican gran cantidad de las zonas industriales de la ciudad, así como una posible influencia en el régimen de vientos que ayuda a dispersar las partículas hacia el sector occidental de la ciudad; las concentraciones altas generan un riesgo de sufrir enfermedades respiratorias por parte de los habitantes de estas localidades sea potencialmente alto comparado con los residentes de otras localidades.

Por otro lado, el sector central de la ciudad, que comprende las localidades de Engativá, Suba y Antonio Nariño, si bien se encuentran dentro del límite normativo, sus concentraciones son indicativo del aumento de la actividad industrial y el uso de vehículos en la ciudad, ya que hay una presencia considerable del contaminante evaluado.

Las localidades orientales de la ciudad (Usaquén, Chapinero y Santa Fe) muestran que en el 2016 tuvieron una calidad del aire aceptable, ya que se encuentran en valores bajos con respecto al límite normativo; debido a su localización, estas áreas cuentan con procesos de disminución de los impactos generados por las emisiones, gracias a su cercanía con los cerros orientales, además cuentan con una densidad poblacional más baja y una menor cantidad de industrias.

Finalmente, observamos en la salida gráfica que el método de interpolación cuenta con unos límites dados por los extremos de la red en cada uno de los puntos cardinales, lo que ingiere que el cubrimiento de la zona urbana de la ciudad no es total y que localidades como Usme, Ciudad Bolívar, San Cristóbal y parte de Tunjuelito y Rafael Uribe no cuentan con estaciones que puedan ayudar a determinar el estado de la calidad del aire que están respirando.

7.1 CONCLUSIONES

- Se realizó la obtención, descarga y análisis del comportamiento de los datos de las concentraciones medidas durante el año 2016 por las estaciones que componen la RMCAB. promediando las para ser usadas en la zonificación del parámetro en la ciudad de Bogotá.
- Se generó, a través de herramientas de análisis espacial (interpolación) disponibles en el software ArcGIS, la zonificación del comportamiento del contaminante PM10 en el año 2016 en la zona de influencia de la RMCAB en Bogotá.

- Se determinó, que hay un estado aceptable de la calidad del aire en la ciudad, donde la zona de mayor afectación por emisiones atmosféricas se encuentra en el área occidental de la ciudad de Bogotá, mientras que el sector que corresponde al costado oriental de la misma cuenta con condiciones más apropiadas del comportamiento de la matriz ambiental.
- El análisis espacial y la zonificación del contaminante demostró que no existe un cubrimiento total por parte de la RMCAB en toda la jurisdicción de la ciudad, dejando por fuera el área rural de la localidad del Sumapaz y una gran extensión del sector sur-urbano de la misma.
- Se recomienda incrementar la cantidad y la distribución de las estaciones que hacen parte de la RMCAB, esto con el fin de obtener un mejor cubrimiento de la región y obtener una dispersión de datos óptima para la elaboración de análisis espacial de la variable evaluada.
- Es importante la integración de variables climatológicas dentro del análisis de la dispersión de contaminantes en la atmósfera, ya que estos elementos determinan un comportamiento independiente de la posición geográfica de las estaciones de monitoreo de calidad del aire.
- Los resultados obtenidos muestran la necesidad de elaboración de políticas y acciones de gestión entorno a la calidad del aire de la ciudad, esto con el fin de disminuir el rango de concentraciones presentes y mejorar así la calidad de vida de los habitantes de la zona urbana de Bogotá.
- Se debe incentivar un mejor uso de las fuentes móviles en la ciudad para ello existen alternativas como el cambio de automotores que cuenten con muchos años de funcionamiento, la mudanza a combustibles más amigables, mayor restricción en las revisiones técnico mecánicas de los vehículos, normatividad rigurosa, entre otras.
- Las empresas que cuenten con fuentes fijas en la ciudad deben considerar el uso de tecnologías limpias y amigables con el medio ambiente, ya sea como dejar de usar combustibles tales como carbón; así como mejorar las instalaciones de las chimeneas y utilizar sistemas de control de emisiones como filtros de mangas, lavadores de partículas, entre otros.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Libros:

- [1] Longley, P., Goodchild, M., Maguire D., Rhind D. (2005). *"Geographical Information Systems And Science"*. Chichester, West Sussex, Inglaterra, Editorial John Wiley and sons Ltda., Capítulos II y III.
- [2] ESRI, Harder, C -Editor-, A.A. (2015). *"The ArcGIS Book, 10 Big Ideas Applying Geography to Your World"*. Reedlands, California, E.E.U.U., Editorial ESRI Press, Capítulo 5.

Artículo de revista:

- [3] Rojas, Néstor Y., (2010), "Aire y Problemas Ambientales en Bogotá", *Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá*, Laboratorio de Ingeniería Química, paginas 2 -6.

Texto tomado de una página de Internet:

- [4] Alcaldía Mayor de Bogotá, Secretaría General, (2017), "Ubicación de La Ciudad", , pagina web <http://www.bogota.gov.co/ciudad/ubicacion>.
- [5] Instituto de Desarrollo Urbano IDU, (2017) "Densidad Poblacional" página web <https://institutodeestudiosurbanos.info/endatos/0100/0140/0144.htm>.
- [6] United States Environmental Protection Agency EPA, (2017), "Particulate Matter (PM) Basics", Pagina web <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>.
- [7] Secretaria Distrital de Ambiente SDA, (2017), "Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá - RMCAB", Pagina web <http://ambientebogota.gov.co/de/web/sda/red-de-calidad-del-aire>.
- [8] Secretaria Distrital de Ambiente SDA, (2011), "Resolución 6982 de 2011 - Por La Cual se Fijan Normas de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica Por Fuentes Fijas y Protección de la Calidad del Aire", Pagina web <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=45334>.

[9] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, (2011), "Resolución 610 de 2010 - Modifica la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia", Pagina web
<http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/bf-Resoluci%C3%B3n%20610%20de%202010%20-%20Calidad%20del%20Aire.pdf>

[10] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, (2011), "Resolución 610 de 2010 - Modifica parcialmente los niveles permisibles de emisión de contaminantes de las fuentes móviles terrestres", Pagina web
http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/emisiones_atmosfericas_contaminantes/fuentes_moviles/Resoluci%C3%B3n_1111_de_2013_-_Modifica_parcialmente_Resoluci%C3%B3n__910_de_2008.pdf